

Mikoriza Nedir?

Mikroplar yalnız hastalık yapmaz, bazıları da bitkisel üretimi birkaç kat artırabilir.

Günümüzde mikroorganizma aktivitesinin toprağın verimliliği ve bitkinin beslenmesi bakımından gerekli unsurlardan biri olduğu artık bütün gerçekliği ile anlaşılmuş bulunmaktadır. Toprak verimliliği bir toprağın doğal zenginliği olarak görülebileceği gibi, onun bitki büyütme ve besleme kabiliyeti olarak da adlandırılabilir. Tabii bitkinin kendisi de toprak verimliliğini değişik yollarla aşağıda sıralandığı şekliyle etkileyebilir:

1) Bitki kökleri salgılarıyla mikroorganizmalara besin ortamı sağlamaktadır. Böylece popülasyon olarak çoğalan yararlı organizmalar hormonlar, vitaminler ve diğer çözücü salgılar üretirler. Kök bölgesinde oluşan bu maddeler makro veya mikro besin elementlerinin alınabilirliğini artırabilirler. Bu etki rizosfer bölgesinde devam etmesi nedeniyle kök-toprak-mikroorganizma veya rizosfer etkisi olarak adlandırılır.

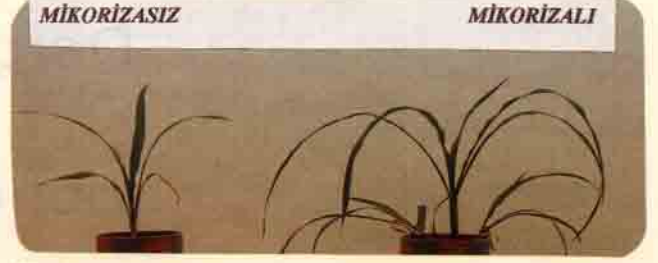
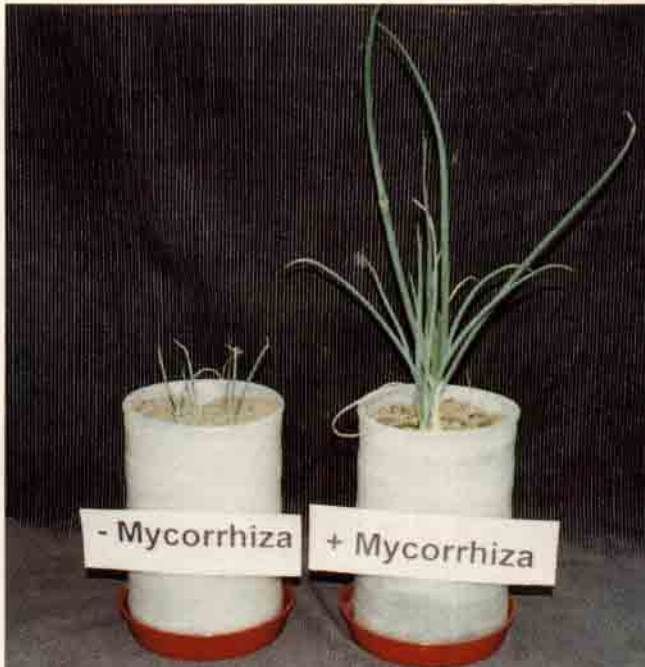
2) Bitkiler kendi doğal mekanizmaları sayesinde farklı şekilde büyümekte veya farklı metabolizmalarından dolayı ortamın beslenme yapısını değiştirmektedirler. Başka bir deyişle, bitki kökleri veya onların salgıları rizosferdeki besin dinamiğini değiştirebilir. Bu değişim daha çok bitki türünün kendi yapısından kaynaklanan, bitki kök büyümesi veya köklerin salgıladığı salgıları sayesinde bir diğer bitkiden farklı olarak topraktaki besin elementlerinin alınabilirliğini artırmaktadır. Her iki durumda da toprakta hareketliliği yavaş olan fosfor (P), çinko (Zn), bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi elementlerin konsantrasyonu artmakta veya bunların alınabilirliği hızlanmaktadır. Burada hatırlanması gereken hususi mikroorganizmaların kök bölgesinde veya rizosferde hayati bir rol aldıkları ve rizosfer bölgesinde organizmaların sürekli mevcut olup, bitki kökleri tarafından sağlanan organik maddelerle beslenmeleri kolaylaştırarak şekilde desteklenmeleri gerektiğidir. Mikroorganizmaların rizosferdeki esas etkinliği ise topraktaki besin elementlerinin bitki tarafından alınmasını artırmak, bitki büyüme hormonlarını üretmek ve bitkiyi zararlı patojenlere karşı korumak gibi yararlıdır. Mikroorganizmaların bazıları tok-

sik salgılar çıkararak ortamda bulunan zararlı patojenleri zehirler, böylece bitkiyi hastalık ve zararlılardan korur. Bu tür yararlı mikroplar birer biyolojik kontrol unsurudur. Kimyasallara alternatif olarak çevre dostudur ve bir nevi 'kamu görevi' üstlenmektedir. Günümüzün en önemli problemi olan çevre kirliliği, hastalık ve zararlılara karşı biyolojik kontrol mekanizması, yani bir organizmayı bir başka organizmaya karşı kullanarak çözülmeye çalışılmaktadır. Özellikle mutualistik simbiyoz, fotosentetik bitkiler ile spesifik organizmalar arasında gerek doğal ekosistemde ve gerekse insan faaliyetleri sonucu değişmiş bulunan sistemde çok önemli görev üstlenmektedir. Çünkü organizmalar bitkilerin kendi başlarına yapamadıkları birçok aktiviteyi sağlayabilme yeteneğindedir. Bu faaliyetlerden en önemlileri;

a) Bitki kökleri aracılığı ile azot fiksasyonu.

Hepimiz baklagil bitkilerini tanıyoruz (gerek bahçedeki yeşil fasulye olsun gerek yol kenarındaki yem bitkileri olsun veya çorbasını içtiğimiz kırmızı mercimek olsun). Ancak, bu bitkilerin köklerinin birer biyolojik fabrika olduğunun büyük çoğunluğumuz bilmiyor. Bu küçük fabrikalar dışarıdan hiçbir girdi sağlamadan havada serbest halde bulunan azotu indirgeyerek bitkilerin kullanımına sunmaktadırlar. Son de-

Mikoriza mantarı ile aşılınmış (sağda) ve aşılınmamış soğan bitkisinin genel görünümü.



Mikoriza mantarı ile aşılınmış (sağda) ve aşılınmamış sorgum bitkisinin genel görünümü.

rece önemli olan bu küçük fabrikalar hem birlikte yaşadıkları bitkiyi daha iyi beslemektedirler-ki bu direkt bizim sağlıklı protein almamızı sağlamaktadır- hem de bulunduğumuz ortamdaki toprağın verimliliğini yükselterek bir süre gelecek olan bitkiye hazır alınabilir azot bırakmaktadır.

b) Topraktaki besin elementlerinin alınmada aktif rol alan mikoriza. Bitkilerin mikroorganizmalarla kurduğu karşılıklı simbiyotik veya mutualistik ilişki sayesinde bitki köklerinin topraktan besin elementi, özellikle de fosfor alınmada mikorizanın rolü son derece önemlidir.

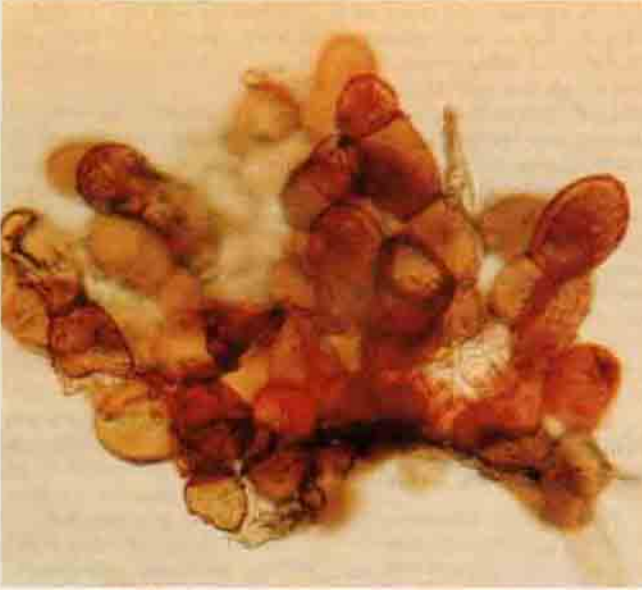
Mikoriza, kelime anlamı ile kök mantarı, ilk defa Frank tarafından 1885 yılında ileri sürülmüştür (*Mycorrhiza*, köken olarak myco mantar; rhiza ise kök anlamına gelen kökeni Yunanca'ya dayanan bir sözcüktür). Mikoriza bitki kökleri ile belirli mantar türleri arasındaki karşılıklı bir yaşam biçimi olarak da ta-

nımlanıyor. Bu işbirliği çerçevesinde bitki mikorizal fungusla karbon, mikorizal fungus da bitkiye besin elementleri ve su sağlamaktadır. Doğadaki bitki topluluklarının % 90'ından fazlasının kök yapıları simbiyotik bir ilişki içindedir, özellikle de mikoriza mantarlarının türleri ile infekte edilmişlerdir.

Fungus bitki kökünün korteksine yerleştiğinde sonra ortama hiflerini salarak iç ortamın bir parçası olmaktadır. İçerde ve dışarda gelişen hifler dışardan içeriye fosfor ve diğer besin elementlerini; içerden dışarıya da mikroorganizma için gerekli karbonu sağlamaktadır. Bu simbiyotik yaşam, doğası gereği çok aktif olup, bir ototrof olan konukçu bitki ile heterotrof organizma arasında besin alışverişinin ve ekolojik açıdan da doğal dengenin korunmasını sağlamaktadır. Mikoriza bu yönüyle ekosistemin besin döngüsünün ve bitki canlılığının devamını sağlamaktadır ki bu, sürekli ve istikrarlı tarım için son derece önemli bir olgudur.

Doğal Gübre Olarak Mikoriza

Bilindiği gibi doğadaki birçok bitki türü ve çeşidi özellikle de orman ağaçları, çayır-meralar ve tarla bitkileri, kültürü yapılan narenciye ve diğer bazı meyve ağaçları ile bazı sebzeler gübresiz ve çoğu zaman suyun az olduğu koşullarda hiçbir girdi gereksinimi olmadan sağlıklı olarak yetişebilmektedirler. Yakın zamana kadar toprakta alınabilirliği yavaş olan besin elementlerinin alınmanın yalnızca bitki kökleri tarafından sağlandığı sanılıyordu. Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, bitki besin elementlerinin köklerinin yanı sıra çoğunlukla mikoriza diye adlandırılan ve teşhisi mikroskop altında yapılan, birim cm kök uzunluğuna başına yüzlerce metre uzunluğunda hif üreten bazı mantar türleri tarafından alındığını ortaya koymuştur.



Mikoriza sporlarının görünümü

Mikoriza, topraktaki sporları aracılığıyla karasal ekosistemlerdeki bitkilerin yaklaşık % 90'ının köklerini enfekte etmektedir. Etkin bir enfeksiyon gerçekleştiğinde ortak bir yaşam oluşturarak, bitkinin su ve bazı mineral maddeleri, özellikle de fosfor, çinko ve bakır gibi besin elementlerinin alınmasına doğrudan katılmaktadır. Mikoriza enfeksiyonu aynı zamanda bitkilerin azot, potasyum ve molibden gibi ağır metallerle de daha iyi beslenmesini sağlamaktadır. Mikorizal mantar çok miktarda hif üreterek bitkinin kök yüzey alanını artırmakta ve kökten çok uzak bölgelerdeki besin elementlerinin söz konusu hifler aracılığı ile alınmasını sağlamaktadır. Mikorizal fungusun besin elementlerine, özellikle de fosfor alınmasına olan katkısı kontrollü sera koşullarında ve bazı tarla koşullarında denemelerle ispatlanmıştır. Fosfor, toprakta bitkiler tarafından alınabilirliği zor olan bir besin elementi olup, alımı toprak mikroorganizmaları ve bitki köklerinin kendi dinamikleri tarafından etkilenmektedir.

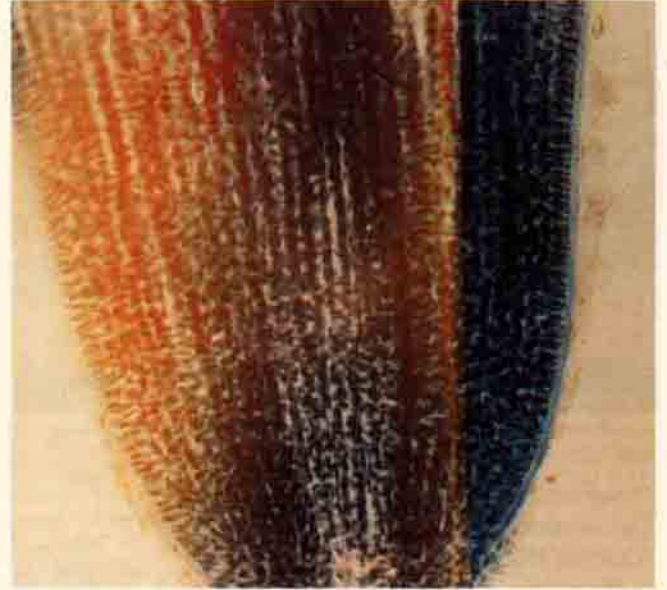
Yeryüzündeki toprakların çoğunluğunda bitki beslenme yetersizliklerinden kaynaklanan hastalık ve zararlıların yol açtığı semptomlara sıkça rastlanmaktadır. Bunların giderilmesi veya kısmen düzeltilmesi için kimyasal gübreler ve tarımsal mücadele ilaçları kontrolsüz ve bilinçsiz olarak kullanılmaktadır. Bitkilerin beslenmesini ve dış etkenlere karşı direncini artıran en etkin bitki adaptasyon mekanizması olarak bilinen mikoriza, hastalık ve zararlılara karşı direnci artırarak, bitkinin daha sağlıklı olarak yetiştirilmesini sağlayabilmektedir.

Geleceğin Gübresi Olarak Mikoriza Aşılması

Daha sağlıklı bir çevre ve daha iyi bir bitkisel verim için fazla miktarda kimyasal gübreler kullanmadan bitki köklerinin mikroorganizmalarca enfeksiyonu bilim adamlarının gelecekte gerçekleştirmek istedikleri hedeflerden



Mikoriza sporlarının görünümü



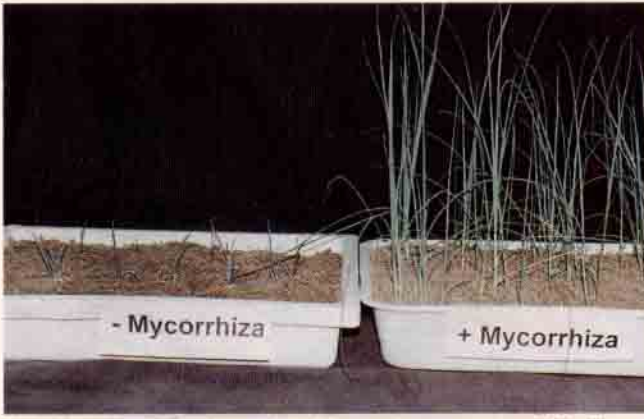
Mısır bitkisinin kök ucu ve rizosfer bölgesi

bir olacaktır. Bitki kökleri bitkinin yaşamsal beslenme organı olup, bitkinin dik durmasını, buna bağlı olarak da topraktan su ve besin elementlerini alarak bitkisel üretimin devamlılığını sağlamaktadır.

Kök toprakta kendisine has bir ekosistem oluşturarak bitkinin büyümesine yön vermeye çalışır. Kök-toprak bölgesi-ki bu ri-

zosfer olarak adlandırılıyor- mikroorganizmalar için olumlu ve olumsuz etkilerin karışık olarak değerlendirildiği bir barınma ortamıdır. Bu mikroorganizmalardan yararlı olanların bitkiye birkaç kat verim artışı sağlamanın yanında, daha sağlıklı kıldıklarından toprak biliminin ve toprak mikrobiyolojisinin en heyecan verici yönünü oluşturmaktadır. Rizosfer bölgesi kökün dış cidarlarının hemen yanındaki ve kökün dışındaki canlı alanı oluşturmaktadır. Bu alanda organizmalar toprakta bitkilerce alınmaz formdaki besin elementlerini alınabilir forma dönüştürür ve bitkiye kazandırır. Bazı organizmalar bitkinin büyüme regülasyonunu sağlamaktadır. Bunun karşılığında bitkiden karbon kaynağı (enerji) ve besin elementleri almaktadır. Fotosentez sırasında oluşan karbondioksitlerin bir kısmı kök bölgesine taşınarak rizodeposit olarak tanımlanan rizosferde mikroorganizmalar için zengin bir beslenme ortamı sağlamaktadır.

Toprakta bulunan zararlı organizmalar zaman zaman bitkisel üretimi ciddi olarak tehdit ederek büyük ekonomik kayıplar oluşturmaktadır. Toprakta besleme kaynağı olan organik madde veya humus miktarı az olduğu zaman da organizmaların bir kısmı zararlı duruma gelerek bitkiye musallat olmakta ve bu durum bazen, maddi ve manevi değer açısından, para ile ölçülemez oranda zarara yol açmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için toprağa yeniden yararlı organizmalar aşılanarak, bunların kökleri enfekte etmesi sayesinde kök bölgesi dinamikleri yararlılık yönünde değiştirilebilir.



Mikoriza mantarı ile aşılanmış (sağda) ve aşılanmamış pırasa bitkisinin genel görünümü.

Mikorizanın Besin Elementlerinin Alımına Etkisi

Mikorizal fungus toprakta bitkilerce alımı yavaş olan besin elementlerinin, özellikle de fosfor alımını 3-4 kat artırdığı, kontrollü koşullarda yapılan denemelerle belirlenmiştir. Bugüne kadar yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen bilgi birikimine göre, mikorizal fungusun nasıl ve hangi mekanizma ile birkaç kat daha fazla besin elementi aldığı henüz tam olarak anlaşılmış değildir.

Rizosfer teknikleri kullanılarak yapılan ölçümlerde, Vesiküler-arbüsküller mikoriza (VAM) ile infekte olmuş bitkilerin alması oldukları P'un % 80'i, N'un % 25'i, K'nun % 10'u, Zn'nun % 25'i ve Cu'nun % 60'ının mikoriza hifleri aracılığı ile alındıkları rapor edilmiştir. Ayrıca mikoriza infeksiyonunun, Ca, SO₄, Fe, Mn, Al ve B alımını kontrol ettiği değişik araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Mikorizanın bitki gelişimi üzerindeki etkisi ürettiği birim kuru madde üretimi ve birim kök uzunluğu başına alınan fosfor miktarı tarafından belirlenmektedir. Toprakta fosfor fazla olduğu zaman mikoriza mantarları inaktif

duruma geçmekte ve çoğu zaman yarar yerine zarar vermektedir.

Mikorizalı bitkiler daha fazla transpirasyon yaptıklarından, birim kök başına alınan su miktarı ve buna bağlı olarak kök bölgesine birim zamanda gelen su akımı mikoriza ile infekte olmamış olan bitkilere göre yaklaşık iki kat daha fazladır.

Mikorizanın, Ca, Mg, Na ve S alımı konusunda pek fazla bir şey bilinmiyor. Yapılan araştırmalar mikorizalı bitkinin % 10 kadar daha fazla K aldığını göstermektedir. Fakat mikoriza türlerinin bir kısmının K'u daha iyi değerlendirdiği bilinmektedir. Yine mikorizalı bitkilerin Ca ve SO₄'ü çok düşük oranlarda bitkiye kazandırdığı bilinmektedir.

Mikorizal infeksiyonun bir diğer önemli etkisi ise, infekte ettiği bitkinin tohumlarının dolgun, fosfor ve diğer besin elementlerince zengin olmasını sağlamasıdır. Tohum kalitesi ve zenginliği bir sonraki dönemde bitkilerin sağlıklı olması ve daha iyi gelişmesi için bitkisel üretimi bir bakıma güvence altına almaktadır.

Mikorizanın fosfor alımı yanında azot alımında da etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle toprakta hareketliliği daha yavaş olan

NH₄-N formunu daha seçici olarak kullandığı tahmin edilmektedir. Mikorizal infeksiyonun P düzeyi düşük olan topraklardan N₂ fiksede eden baklagillerde nodül sayısını ve azot içeriğini birkaç kat artırdığı bilinmektedir. Genel kanıya göre nodül oluşturan bitkiler fazla miktarda fosfora gereksinim duyduğundan, N₂ fiksasyonu yapan baklagil bitkileri fazlasıyla mikorizaya bağlıdır. Bu nedenle rizobium ile infekte olan bitkilerin fotosentez aktivitesi yüksek olup, bu yolla üretilen karbonhidrat miktarı iki katına çıkmaktadır.

Mikorizanın Bitki Sağlığı Üzerine Etkisi

Mikoriza bitki köklerini diğer patojenik organizmalara karşı koruduğu gibi, çevre faktörlerini yarattığı ağır metal toksisitesi ve tuzluluk gibi streslere karşı bitkiyi koruyarak, bitkinin direncini artırmaktadır. Ayrıca, mikorizal infeksiyon kirletilmiş veya dezenfekte edilmiş toprakların bitki bünyesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabilir. Mikoriza bitki hastalık ve zararlarına karşı da bitkiyi hem iyi besleyerek korur hem de direkt rizosferde ve diğer organizmalarla mücadele ederek etkin duruma gelir. Mikoriza ile aşılanan domates bitkisinin *Fusarium oxysporum*'a karşı direnci artmıştır.

Mikoriza hiflerinin P'ü etkin bir şekilde almasının nedenlerinden biri, hif çaplarının son derece küçük (2-10 µ) ve yaratmış olduğu yüzey alanlarının son derece geniş olmasıdır.

Bazen bitki, mikoriza mantarı ile infekte olduğu halde besin elementi alamıyorsa veya yetersiz besin elementi taşıyorsa bunun nedenleri; zayıf bir kök infeksiyonu, zayıf bir hif oluşumu, hiflerin yetersiz besin elementi taşınması, arbüsküller aracılığı ile besin elementi taşınmasının az olması gibi faktörler olabilir. İkinci bir neden de, fosforu, mikoriza hiflerinin vakuollerinde polifosfat olarak biriktirmesi ile ATP'ye alternatif bir enerji oluşturmalarıdır.

Mikoriza ile Infekte Olmuş ve Olmamış Bitkilerin Beslenme Kaynakları

Mikoriza ile infekte olmuş ve olmamış bitkiler aynı fosfor kaynağını kullanmaktadırlar. Fakat, mikoriza infeksiyonunun büyüklüğü veya etkinliği kendini şu şekillerde gösterir:

Mikorizasız bitkinin değerlendiremediği, aşağıdaki fosfor formlarını ve kaynaklarını etkin olarak kullanmasıdır. Bunlar;

1. Kristal heldeki Fe-P ve Al-P,
2. Kireçli bölgelerdeki Ca-P'ü etkin bir biçimde çözündürüp alabilmesi,
3. Fitatın, bünyesindeki saklı bulunan fosfordan yararlanıyor olması,
4. Organik formdaki P'dan da yararlanabilmesi.

Mikoriza Kullanımının Sürdürülebilir Tarıma Kazandıracağı Katkılar

Daha Az Kimyasal Gübre Kullanımı: Mikoriza ile infekte olmuş ve olmamış bitkileri arasındaki temel farklılık; mikorizanın bitki gelişimi üzerindeki etkisi; ürettiği birim kuru madde miktarı, birim kök uzunluğu ve hif uzunluğu başına alınan fosfor miktarı tarafından belirlenmektedir.

Mikorizalı bitki, çok düşük miktarda yapılan fosfor gübrelemesi ile kritik düzey eğrisine ulaşırken, infekte olmamış bitkinin kritik düzeye ulaşabilme için çok daha fazla miktarda gübre uygulamasına gereksinim duymaktadır.

Bahçe ve tarla tarımında tek ve çok yıllık bitkilere, özellikle de narenciye fidanlarının köklerine dikim ile birlikte mikoriza inokülümü uygulanması, hem daha az mikro element gübrelemesini gerektirecek hem de bitkinin ömrü boyunca mikoriza ile infeksiyonu sayesinde çevre faktörlerine karşı daha iyi korunmasını sağlamış olacaktır. Ayrıca bitkiler mikoriza ile infekte oldukları zaman yalnızca çinko ile değil, bakır, demir ve molibden gibi ağır metal olan besin elementleri ile de daha iyi beslenme olanağı bulacaktır.

Daha Etkin Su Kullanımı: Mikoriza bitkinin kuraklığa karşı dayanıklılığını da artırabilir; bu artış ya direkt hifler aracılığı ile ya da mikorizanın bitki fizyolojisi ve morfolojisi üzerinde yaptığı değişikliklerden kaynaklanan kök büyümesi veya kılcak kök oluşumu ile ilgilidir.

Günümüzde su kaynaklarının azalması veya sulanabilen tarım alanlarının artması ile mikorizanın bitki su kullanım randımanına ve kuraklığa karşı direncinin artırılmasına katkısı ciddi olarak araştırılması gereken konuların başında gelmektedir. Bu konudaki çalışmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Bu konu özellikle Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu gibi az yağış alan ve bazı yıllarda kuraklık tehlikesine maruz kalan bölgeler için büyük önem taşımaktadır.

Daha Sağlıklı Bir Çevre: Daha Az Pesticit Kullanımı : Bitki mi-

Mikoriza mantarı ile infekte olmuş bir bitki kökünün ve mikoriza mantarının hiflerinin mikroskop altındaki görünümü.



koriza ile infekte olduğunda daha iyi besleneceğinden hastalık ve zararlılara karşı daha dayanıklı olacaktır. Mikoriza, hastalık ve zararlılara karşı bitkinin direncini artırdığı için daha az pestisit kullanılacak, bunun sonucu olarak kimyasal mücadele masrafları da önemli ölçüde azalabilecektir. Toprakta Daha Az Kadmiyum Birikimi: Fosforlu gübrelere özellikle süperfosfat ve topraklara katılan kadmiyum gibi ağır metallerin miktarı mikoriza kullanımına bağlı olarak daha az kimyasal gübre kullanımı sayesinde önemli derecede azaltılabilecektir.

Besin Elementlerinin Daha Az Yıkınması : Fazla miktarda kullanılan azotlu gübrelere atıklarının oluşturduğu NO₃'a bağlı taban suyu kirliliği mikoriza kullanılarak oluşturulan geniş kök yüzey alanı ile daha derin ortamlardaki nitratların iyi sömürülmesi sonucunda nitrat yıkınmasının kısmen önlenmesi suretiyle azaltılabilir.

Çevre Kirlenici Etmenler: Mikoriza, bitkinin ağır metallere karşı direncini artırdığından, araştırmalardan elde edilecek bulgular sayesinde öncelik kazanması beklenmektedir.

Daha Az Toprak Erozyonu: Toprak strüktürü veya diğer yapısal bozukluklardan dolayı oluşan su ve rüzgâr erozyonuna karşı mikoriza hiflerinin strüktür oluşumuna doğrudan katkısı ile erozyon tehlikesi azalabilecektir. Diğer taraftan mikorizayla infekte olan bitkiler olumsuz çevre koşullarından daha az etkilenmek suretiyle daha iyi gelişeceklerinden toprak yüzeyinde daha sık bir örtü oluşturacaklar, bu da erozyonun önlenmesine büyük katkı sağlayacaktır.

Tuzlu ve Çok Kireçli Alanların Bitkisel Üretime Alınması : Çok tuzlu ya da çok kireçli olmaları nedeniyle ekonomik olarak bitkisel üretime uygun olmayan alanlarda mikoriza aşılması ile kültür



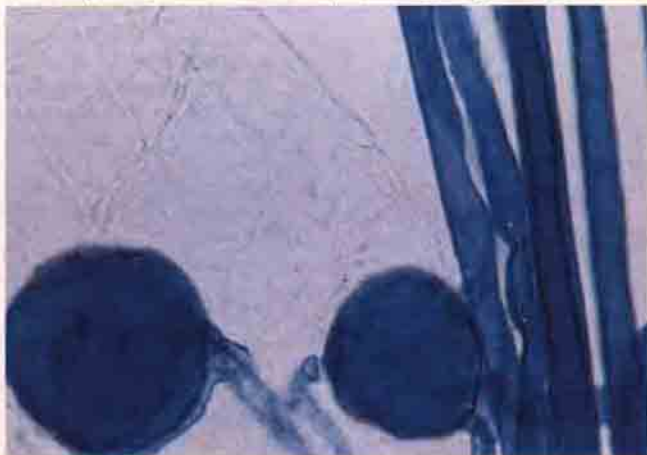
Mikroskop altında mikoriza hifleri ve sporlarının genel görünümü

bitkilerinin bu ortamlara adaptasyonunun sağlanmasıyla bu alanlar da bitkisel üretime kazandırılabilir.

Mikoriza ile İlgili Çalışmalar

Gelecekte tarımın ve buna bağlı olarak insanlığın devamı için toprak kullanımı ve yöntemi bugün artık bir çevre sorunu olarak da değerlendirilmektedir. Birim alandan maksimum düzeyde yararlanmak, verimi artırmak, ortama uygun mikoriza çeşitlerinin bitki tür veya genotiplerine göre seçilmesi, bu türlerin besin elementlerinden yararlanma olanaklarının belirlenmesi son derece önem kazanmaktadır.

Mikroskop altında mikoriza hifleri ve sporlarının genel görünümü



Türkiye, içinde bulunduğu iklim kuşağı ve coğrafi konumundan dolayı kil ve kireç içerikleri yüksek, organik madde içeriği düşük ve yer yer de strüktürü bozuk topraklara sahiptir. Toprakların bu tür fiziksel, kimyasal ve biyolojik yönden arzu edilmeyen özellikleri, toprakta bitkilerce alınabilir besin elementlerinin konsantrasyonunu düşürmektedir. Böyle topraklarda bitkilerin iyi bir gelişme göstermeleri için fazla miktarda besin elementi gübrelemesine gereksinim duyulmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler için mevcut kaynakların üstünde para ayırarak dışarıdan gübre temin etmek son derece zor ve ülkelerin milli ekonomisine ağır bir yük getirmektedir. Bunun yerine bitkilerin kendi geliştirdikleri ve koşullara bağlı olarak gereksinim duydukları besin elementlerini sağlayan doğal uyum mekanizmalarının bilinmesi ve bunların uygulamaya aktarılması geleceğin önemli tarım stratejilerindedir. Son yıllarda gübre fiyatlarının artması ve bazı gübre hammaddelerinin sınırlı olması nedeniyle mikoriza gibi hiçbir girdi gereksinimi olmayan doğal bir kaynaktan çevre koruma açısından ve ekonomik anlamda yararlanılması insanlığın geleceği yönünden akılcı bir yaklaşım olacaktır.

Mikoriza sporlarının teknolojik olarak üretilmesi ve toprağa uygulanması şu ana kadar konu ile ilgili bilim adamlarının üste-

sinden gelemediği zorluklardan biridir. Bu bağlamda doğada var olan mikoriza türlerinin belirlenmesi ve bunlardan aktif olarak çalışanların seçilip yeniden çoğaltılarak toprağa uygulanması veya doğal mikorizanın etkinliğini artıracak tarım tekniklerinin geliştirilmesi gelecekte araştırmacıların ilgi odağı olacaktır. Gelecekte toprak biyoteknolojisi bilgisi kullanılarak bitki elementleri döngüsünün gerçekleştiği toprakta fosfor, çinko ve diğer besin elementlerinin alımında etkin rol alan mikoriza mantarları ve diğer yararlı mikroorganizmalar üretilerek daha az gübre kullanımı yanında, daha temiz bir çevre sağlanabilir. Mikoriza sporlarının doğadaki bilinen türlerinin üretilmesi henüz teknolojik olarak mümkün olmadığından, geniş tarım alanlarında bitkilere mikoriza aşılmasının yapılması için, bitki kökleri aracılığı ile mikorizal spor üretilmesi bir zorunluluktur. Bitki türleri ile spesifik mikoriza fungusunun sporları arasındaki ilişkinin toprak-besin elementleri ve çevre faktörleri düzeyinde özellikle her yıl yeni yeni çeşitlerin/hibritlerin üretim alanlarına girdiği ülkemizde bilinmesi ve bu bitki türleri ile uyumlu çalışan sporların üretilmesi konusundaki gereksinim giderek artmaktadır. Toprakta var olan doğal mikoriza türlerinin izolasyonu ve çoğaltılması ileride toprak biyoteknolojisi bilgisini geliştirerek bu alanda doğal mikoriza üretecek fabrika ve işletmelerin kurulmasına öncülük edecektir. Bu yolla birçok kişiye iş olanakları sağlanmış olacaktır. Bölge koşullarına uygun mikoriza türlerinin belirlenmesinden sonra mikorizanın besin elementlerinin etkin kullanımı ve çevre kirliliğinin azaltılması ve orman ekolojisinin korunmasındaki rolleri araştırılması gereken konuların başında gelecektir.

Mikoriza-Rhizobium arasındaki mutualistik ilişki, mikorizanın hastalık ve zararlılara karşı bitki direncini artırdığına ilişkin araştırmalar yakın gelecekte çok güncelleşecektir. Günümüzde su kaynaklarının azalması veya sulanabilir alanların artması ile mikorizanın bitki su kullanım randımanına olan katkısı ciddi olarak araştırılması gereken konuların başında gelmektedir. Toprak strüktürü bozukluğu veya diğer yapısal bozukluklardan dolayı oluşan su ve rüzgâr erozyonuna karşı mikoriza hiflerinin strüktür oluşumu ve buna bağlı olarak mikorizanın erozyon kontrolüne olan etkileri mutlaka araştırılmalıdır.

*İbrahim Ortaç
Yrd.Doç.Dr., Çukurova Üniversitesi, Ziraat
Fakültesi, Toprak Bölümü, Adana*

Nitrik Oksit ve Karbon Monoksit: Hücresel Yeni Haberciler

Gözümüzün önüne kalabalık bir şehrin en işlek caddesinin, en yoğun saatini getirelim. Caddede, herkes ulaşacağı yere bir an önce varmak için telaş içinde koşmaktadır. Kimisi gideceği yere yürüyerek, kimisi de, minibüs, otobüs ya da tren ile ulaşmak için sraya girmiş. Tam bir karmaşa ortamı. Yeni bir düzene ulaşmak için her gün yaşanan bir düzensizlik. Birkaç saat sonra bu karmaşanın yerini alan hoş bir sessizlik ve yaşamın bu şekilde devamı.

Yukarıda genel olarak tanımlanmak istenen ve bir düzene ulaşmak için süregelen bu mücadele hücrelerimizde her saniye daha da yoğun olarak yaşanmaktadır. Hücrelerimizde, saniye ile ifade edilen sürelerde gerçekleşen binlerce karmaşık kimyasal reaksiyon, hücre homeostazisi (dengeyi) sağlamakta ve bu şekilde yaşam devam edebilmektedir.

Hücresel homeostazisin sağlanmasında, belli merkezlerden kaynaklanan uyarıların (sinyallerin), hızlı bir şekilde ilgili yerlere iletimi gerekmektedir. Organizmamızdaki bu iletim, günümüz teknolojisinin bile anlamakta zorlandığı çok kompleks ve mükemmel bir yolla gerçekleşmektedir.

Bugünkü bilgilerimiz ışığında, canlıların haberleşmesinin;

- Organizma tarafından üretilen kimyasal maddelerle,
- Hücre yüzeylerinde bulunan, geçit bölgeleri "Gap junction" aracılığıyla sağlandığı bilinmektedir.

Kimyasal maddeler aracılığı ile olan iletimde, hormonlar (iç salgı bezleri tarafından sentezlenen ve kan dolaşımına verilerek tüm organizmada düzenleyici rol oynayan moleküller), nörotransmitterler (sinir hücreleri tarafından salınan ve daha kısa mesafede etkili olan moleküller) ve büyüme faktörleri, rol almaktadır. Gerek hormon gerekse de transmitterler ve büyüme faktörlerinin tümü, birincil haberciler (first messengers) olarak adlandırılmaktadır. Birincil habercilerin, etkilerini gösterebilmeleri için hücrelerin yüzeyinde, sیتoplazmasında veya çekirdeğinde bulunan ve reseptör adını verdığımız, yapılarla birleşmeleri gerekmektedir. Hücrelerimizdeki reseptörler genellikle protein yapısındadır ve en önemli özellikleri, sadece kendilerine özgü birincil habercilere duyarlı olmalarıdır.

Birincil haberci-reseptör, etkileşiminden sonraki olay, sinyalin ara-

cı bir molekül tarafından iletimidir. Organizmamızdaki bu aracı fonksiyonu yürüten tek molekül, G-protein (Guanozin nükleotidi bağlayan protein) olarak adlandırılan yapıdır. Bu molekül aracılığı ile inaktif durumdaki bir enzim (enzimler, hücresele seviyede kendilerine özgü reaksiyonları çok kısa sürede ve en ekonomik şekilde gerçekleştiren protein yapısında moleküllerdir) aktif hale getirilir. Aktif hale geçen bu enzim de, iletimde ikincil haberciler olarak adlandırdığımız aktif moleküllerin sentezlenmesini sağlar.

Sinyal İletiminde G-Proteinleri

G-proteinleri, birincil haberciler ile birleşen reseptörlerin, hücre enzimlerine bilgi aktarımını sağlayan moleküllerdir. G-proteinleri, hücre membranının iç yüzeyine yerleşik olup alfa, beta ve gama olmak üzere üç ünitenin birleşmesinden oluşurlar. G-proteininin aktivitesinden sorumlu olan alfa alt ünitesidir. Bu üniteye, organizmadaki yüksek enerjili moleküllerden olan, guanozin trifosfat (GTP) bağlandığında, molekül aktivite kazanmakta. GTP'nin bir fosfat bağının kırılması ile oluşan guanozin difosfat (GDP)'a dönüşümünde ise aktivitesi sonlanmaktadır. G-proteininin alfa alt birimine bağlanan GTP veya GDP'ye bağlı olarak molekülün aktivite gösterip göstermemesi, bir elektrik düğmesinin kapalı ya da açık durumuna benzetilmektedir. GTP bağlı durum düğmenin açık şeklini oluştururken, GDP bağlı durum da düğmeyi kapatmaktadır.

G-proteininin aktivasyonu ile iletimde ikincil haberciler devreye girer. Alfa subünitine GTP bağlı aktif G-proteini, ilgili enzimi, inaktif durumdan aktif hale geçirdikten sonra, kendisinin de inaktif duruma dönüşmesi gerekmektedir. Bu görevi de, GTPaz (guanozin trifosfataz) adlı, GTP'den bir fosfat kopartarak onu GDP haline getiren enzim yapar. Burada önemli olan nok-

ta, ortamdaki GTPaz aktivitesindeki zamanlamadır. Kendisi de bir sinyal iletimi ile oluşturulan GTPaz, eğer erkenden aktivite gösterirse G-protein aktivitesi gerçekleşmeyecek ve sinyal iletimi o safhada kesilecektir. Ya da başka bir ihtimal olarak, GTPaz aktivitesi hiç ortaya çıkmazsa, G-proteininin alfa altbirimi, sürekli olarak, sinyal göndererek hücredeki dengenin bozulmasına neden olabilecektir. İşte zamanlama olarak böylesine hassas bir reaksiyonda meydana gelebilecek en ufak bir gecikme veya hızlanma, birçok hastalığı da beraberinde getirebilmektedir. Yapılan çalışmalarda, alfa altünitinin, GTP bağlama bölgesini etkileyerek, GTPaz'ın yıkımından koruyan bir mutasyonun (genetik şifrede oluşan yapı değişmesi), kalın bağırsak tümörlerine neden olduğu gösterilmiştir. İşte hücrelerimizde saniyelerle ifade edilen zamanlarda, binlerce reaksiyon böylesine hassas dengeler içinde gerçekleşmektedir.

Hücresele İletimde İkincil Haberciler

G-proteinleri tarafından aktif hale getirilen enzimler, ikincil haberciler olarak tanımlanan bir dizi molekülün sentezini gerçekleştirirler. Bunlardan başlıcaları;

- 1-) Siklik adenozin monofosfat (cAMP): Adenilat siklaz enziminin, adenozin trifosfat(ATP)'ı yıkarak oluşturduğu molekül.
- 2-) İnozitol trifosfat (IP3) ve diaçil gliserol (DAG): Fosfolipaz-C adlı enzimin, fosfotidil inozitol 4,5 bifosfat'ı yıkarak oluşturduğu ikincil habercilerdir.
- 3-) Araşidonik asit: Fosfolipaz A2'nin hücre zarında bulunan, fosfoinozitol'ü yıkarak, oluşturduğu bir moleküldür.
- 4-) Siklik guanozin monofosfat (cGMP): Guanilat siklaz enzimi, guanilat trifosfat molekülünü (GTP) yıkarak oluşturduğu ikincil habercidir.

Oluşan ikincil haberciler de, kendilerinden sonraki aşamayı gerçekleştiren diğer enzimleri(c-

AMP'ye bağımlı protein kinaz, protein kinaz-C, c-GMP'ye bağımlı protein kinaz, tirozin protein kinaz gibi enzimleri) veya iyonlan(Ca²⁺, K⁺, Cl⁻) etkileyerek, hücresele cevabın oluşmasını sağlarlar.

Bazı Hastalıklar ve G-Proteinleri

Hastalıkların gelişimi üzerine yapılan moleküler düzeydeki çalışmalar, tümör oluşumunun ve diğer bazı hastalıkların, G-proteinlerinin etkilenmesi sonucu oluştuğunu göstermektedir. Örneğin, kanser gelişiminde etkili bir yapı olan, p-ras molekülü, G-proteininin alfa altünitesine benzemekte ve bu molekülün etkisi ile hücre sürekli uyarılmaya karşı karşıya kalmaktadır. Büyüme faktörlerinin kullandığı bir G-proteininin böyle bir moleküle karşı karşıya kalması, hücrenin durmaksızın bölünerek çoğalmasına, sonuçta da tümör gelişimine neden olmaktadır.

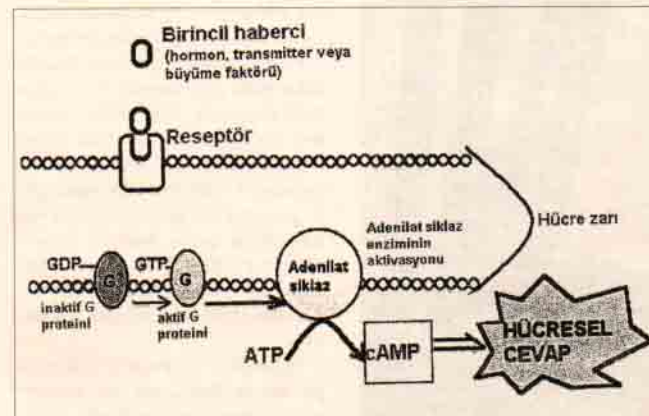
Benzer olarak bazı infeksiyon hastalıkları da (difteri, boğmaca ve antrax gibi), G-proteininde bazı değişiklikler oluşturmakta ve hastalığın seyriyi ağırlaştırmaktadır.

Ayrıca, hormon veya nörotransmitter gibi birincil habercilerin ya da G-protein yapısını değiştiren, doğumsal veya sonradan gelişen bozukluklarda da hastalıklar oluşmaktadır. Bunlara verilebilecek başlıca örnekler, şeker hastalığı ve uzun süreli böbrek yetmezliğidir. Bu hastalarda G-proteini değişiklikleri belirlenmiştir.

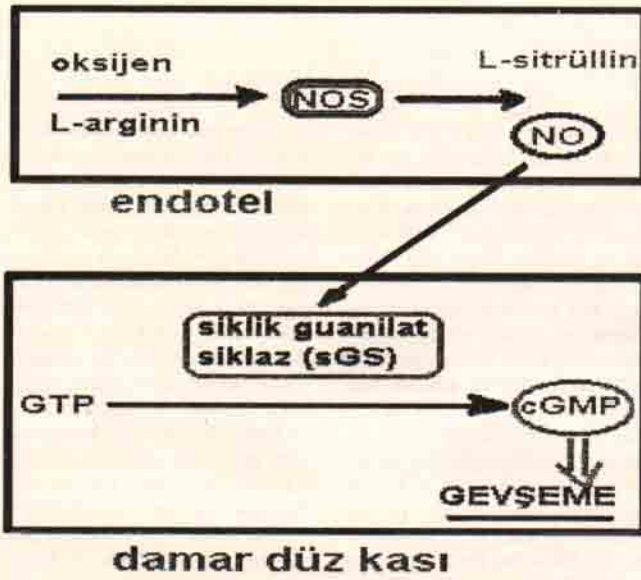
İletimde Yeni Keşfedilen Moleküller: NO ve CO

Ancak 1990'lı yıllarda, küçük moleküllü bileşikler olan, NO (nitrik oksit) ve CO (karbon monoksit)'in hücre iletimindeki fonksiyonlarının anlaşılması üzerine, sinyal iletimi için kabul edilen klasik görüşlerde değişiklikler olmuştur. Özellikle nörotransmitterlerin (sinir sistemindeki kimyasal habercilerin) aminoasit ya da peptit yapısında oldukları, presinaptik (iki sinir hücrelerinin birleşim yerini oluşturan bölgenin üst kısmında kalan sinir ucu) bölgelerde sentezlendikleri, salgı keseciklerinde depolandıkları ve Ca²⁺'a bağımlı olarak salındıklarının yanında, kendilerine özgü bir protein reseptörü sayesinde sinyal iletimini gerçekleştirdikleri konusundaki bilgiler artık değişikliğe uğramıştır.

1987 yılına kadar, damarlarda gevşemeyi sağlayan bir faktörün var olduğu bilinmesinin rağmen bu molekülün, yapısı açıklığa kavuşturulamamıştı. Damarları gevşetici bu moleküle endotel kaynaklı gevşetici faktör (EDRF) adı verilmişti. Ancak, bu molekülün NO olduğu-



Hücresele haberleşmede ikincil habercilerden cAMP sistemi.



NO'nin sentezi ve fonksiyonu

nun anlaşılmasından sonra, bu konu üzerinde yapılan çalışmalar her geçen yıl bir çığ gibi artmış ve bu yüzden, Science dergisi NO'yi, 1992'de yılın molekülü seçmiştir.

NO Nasıl Sentezlenmektedir?

NO, bir aminoasit (proteinlerin yapıtaşları) olan, L-arginin'den, nitrik oksit sentetaz (NOS) adlı bir enzim aracılığı ile oluşmaktadır. İki basamakta oluşan bu reaksiyonun ilk safhasında arginin, N-hidroksi arginine dönüşür. Bu reaksiyonun oluşmasında, NADPH gibi kofaktörlere (reaksiyonun oluşumunu kolaylaştıran moleküller) ihtiyaç vardır. İkinci basamakta da benzer kofaktörlerin etkisi ile, N-hidroksi-argininden, NO ve sitrüllin oluşmaktadır.

NO, küçük bir molekül olduğundan, hücre zarından difüzyonla kolayca hücre içine girebilmektedir. Yarı ömrü beş saniye kadardır ve bu süre içinde, ilgili dokuya difüze olarak, etkisini oluşturmaktadır. Bu şekilde ortamda artan NO, belli bir düzeyden sonra, kendisinin sentezini gerçekleştiren nitrik oksit sentaz (NOS) enzimini inhibe ederek hücresel dengenin korunmasını da sağlamaktadır.

NO sentezini sağlayan NOS enziminin en yoğun bulunduğu yer beyinciktir. NOS'in 4 izoformu (fonksiyon olarak aynı olmasına rağmen farklı gen bölgeleri tarafından kodlanan yapılar) bulunmaktadır. Bunlar;

a) Beyindeki izoformu (brain NOS -bNOS-): Beyindeki bu izoform, nöronlarda bulunmakta ve iletimde görev alan Ca-kalmodülün sisteminin etkisindedir. Beyinde önemli bir nörotransmitter olan glutamat, kendine özgü NMDA (N-metil-D-aspartat) reseptörlerine bağlandık-

tan sonra, postsinaptik hücre içine Ca girişini başlatmakta ve hücre içine giren Ca da kalmodüline bağlanarak, NOS'u aktif hale getirmektedir.

b) Endotel izoformu (eNOS): Bu izoform da Ca-kalmodüline bağlı olarak aktivite göstermekte ve damar endotel hücrelerinde bulunmaktadır. NO sentezini gerçekleştiren, damarların gevşemesini sağlamaktadır.

c) Makrofaj izoformu (mNOS): Vücudun savunma sistemini oluşturan makrofajlarda rastlanmıştır. Sentezlediği NO sayesinde, enfeksiyöz ajanların yok edilmesini sağlamaktadır.

d) Hepatosit izoformu (hNOS): Karaciğerde bulunan ve Ca-kalmodülün'e bağımlı bir enzimdir.

NO ve Etkilediği Sistemler

Sinir Sistemi ve NO: NOS'un en yoğun bulunduğu sistem sinir sistemidir. Yapılan deneysel çalışmalarda NO sentezinin engellenmesi sonucu deney hayvanlarında, öğrenme yeteneğinin azalması, görme, koku, ağrı ve açlık duygularında bozukluklar gelişmektedir. Bunun yanında, yüksek konsantrasyonları beyin hücrelerinin tümünde ölüme yol açmaktadır. NO'nun bu önemli fonksiyonları belli konsantrasyonlarda gelişmektedir.

Ayrıca son yapılan çalışmalarda beyinde, NO sentezinin bozulması sonucu epilepsi (beyindeki uyarıcı sistemlerin baskın hale gelmesi sonucu oluşan istem dışı hareketlerle karakterize bir hastalık) gelişimine neden olduğu bildirilmektedir. Bunun yanında epileptisi önlediğine dair çalışmalar da mevcuttur. İşte bu tip, birbirine zıt farklı etkiler, NO düzeyi ile ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Tüm bu çalışmalar, NO'nun sinir sisteminde

homeostazisi sağlayan çok önemli bir transmitter olduğunu göstermektedir.

Mide ve Bağırsak Sisteminde NO: Mide ve bağırsak sisteminin innervasyonunu (uyarılmasını), sağlayan sinir hücrelerinde de NOS'un varlığı gösterilmiştir. Özellikle, pilor stenozlu (midenin oniki parmak barsağına açıldığı bölgenin sürekli kasılı kalması) ve akalazyali (yemek borusunun sürekli kasılı halde bulunması) hastaların, bu bölgelerinde yapılan biyopsi örneklerinde, NOS eksikliğinin belirlenmesi, NO'nun bu bölgelerde de dilatasyonu sağlayan çok önemli bir molekül olduğunu göstermektedir. Kalp damar sisteminde olduğu gibi, mide bağırsak sisteminde de, NO yapılarının gevşemesini sağlamaktadır.

Kalp ve Damar Sisteminde NO: Damar endotel (damarların en iç tabakasını oluşturan hücreler) hücrelerinde sentezlenen NO, sağladığı gevşeme ile, kan basıncını ve kan akımını düzenlemektedir. Bu etkisini de yine, damar düz kas hücrelerine difüze olarak, inaktif guanilat siklaz enzimine bağlanıp onu aktif hale getirerek sağlamaktadır. Aktifleşen guanilat siklaz enzimi de, guanozin trifosfatı (GTP), siklik guanozin monofosfat (cGMP) haline getirir. cGMP'da, kas gevşemesini sağlamaktadır. NO'nun sentezlendiği endotel hücrelerini etkileyen genetik hastalıklarda (şeker hastalığı, genetik geçiş gösteren hiperlipidemiler) veya sonradan oluşan endotel hasarı yapan olaylarda (sigara içimi, hareketsiz hayat tarzı, yağlı beslenme vs.), ortamda yeterince NO oluşamayacağından damarlarda hipertansiyon (damar basıncında artış) gelişecektir.

NO, akciğerlerde de havalanmanın gerçekleştiği bronşlarda (hava yolları) gevşeme meydana getirmektedir.

Savunma Sistemi ve NO: NO, organizmanın koruyucu hücreleri olarak kabul edilen, makrofaj ve nötrofillerden yüksek düzeylerde salgılamak, tümör hücreleri ve bakteriler gibi organizmaya zararlı yapıların yok edilmesinde görev almaktadır.

İletimde Bir Diğer Toksik Gaz : CO

Eksoz gazı, sigara dumanı gibi hava kirliliğine yol açan birçok atığın bileşiminde bol miktarda bulunan ve insan sağlığı için tehlikeli olan CO'nun, ilk kez 1993 yılında yapılan çalışmalarla, damar gevşemesinin sağlanmasında çok önemli fonksiyonları olduğu anlaşılmıştır. Ancak, CO'nun damarların normal yumuşaklığını sağladığı miktar diğer atıklarda bulunan CO miktarlarının çok çok altındadır.

CO Sentezi ve Etkileri

CO, sitokrom P-450 enzim sisteminde (bu enzim sisteminin en önemli fonksiyonu, organizmaya dışarda giren veya bizzat organizmada oluşan zararlı moleküllerin parçalanmasıdır), hem adlı protein molekülünün, hem oksijenaz adlı enzim tarafından parçalanması ile oluşmaktadır.

CO ve NO'nun en önemli ortak özellikleri, guanilat siklaz enzimini aktive etmeleri ve bu enzimin de guanozin trifosfatı yıkarak, siklik guanozin monofosfat (cGMP) oluşturmalarıdır. Ortamda artan cGMP'nin başlıca fonksiyonu, düz kaslarda gevşemektir. Ayrıca, CO ve NO'nun, kalp-damar ve sinir sistemi üzerine olan etkileri de yine cGMP sayesinde gerçekleşmektedir.

CO ve NO'nun etkilerinin hızlı olmasının bir diğer nedeni de, kendileri bir transmitter sayılmalarına karşın, diğer transmitter veya hormonların kullandığı reseptöre bağlı G-proteininin yolunu kullanmadan, kendilerinin direkt olarak, ikincil haberci molekülünün oluşumunu sağlamalarıdır.

CO ve NO, organizmadaki iç dengenin sürdürülmesini belli konsantrasyonlarda gerçekleştirmek ve bu düzeylerin üstünde ise, moleküllerin zararlı etkileri ön plana çıkmaktadır. Bu gaz moleküllerin, tedavi amacı ile kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda, sadece NO'nun şiddetli astım (akciğerlerde havalanmanın gerçekleştiği odacıklarda olan büzüleme ile seyreden hastalık) ataklarında kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Ancak yine de gerek CO gerekse de NO'nun, etkilerinin hızla ortaya çıkması ve yarı ömürlerinin çok kısa olması nedeni ile henüz tam olarak tedavide kullanımları söz konusu değildir.

Hücrelerimizdeki sinyal molekülleri ve bu moleküllerin organizasyonu hakkında yapılacak çalışmalar, birçok hastalığın nedenini aydınlatılabileceği gibi, tedavi stratejilerini de belirleyebilecektir. Ayrıca, hücreye ilk bakıldığında, halsiz tam olarak belirlenemeyen reaksiyonların, hücresel dengeyi nasıl sağladığının anlaşılması, insan sağlığı için çözülmesi gereken önemli problemlerden biridir.

Hakan Boyunağa* - Cemil Çelik*
Dr., Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Univ. Tıp Fak. Biyokimya ABD. Samsun

Kaynaklar

1. Moncada, R.M.J., Palmer, A., Higgs, "Nitric Oxide: Physiology, Pathophysiology, and Pharmacology" Pharmacological Reviews, 1991, Vol.43, No.2, 109-134.
2. A. Verma, D.J. Hirsch, G. E. Glitt et al., "Carbon Monoxide: A putative Neural Messenger?" Science, 15 Jan 1993, Vol.259, P.381-384.
3. S.A. Khanlou, D. Yates, R.A. Robbins, et al., "Increased nitric oxide in exhaled air of asthmatic patients." Lancet, 1994;343:133-135.
4. M.I. Simon, M.P. Strathman, N. Gauthier, "Diversity of G protein in signal transduction. Science, 1991;252:802-808.
5. J. Schlessinger, "How receptor tyrosine kinase activates ras." TIBS, 1993;18:273-275.